

UDK 528.482:531.1:007.52:692.4
Izvorni znanstveni članak

Mogućnosti geodetskih instrumenata u određivanju dinamičkih pomaka građevina

Ante MARENDIĆ, Zdravko KAPOVIĆ, Rinaldo PAAR – Zagreb¹

SAŽETAK. Određivanjem pomaka i deformacija građevina tijekom eksploatacije dobiva se saznanje ponaša li se građevina u skladu s projektnim rješenjima, a dobiveni podaci predstavljaju važan parametar u procjeni stanja i sigurnosti građevine. Stalnim razvojem geodetskih instrumenata omogućeno je rješavanje sve složenijih i zahtjevnijih zadataka koji se postavljaju pred inženjersku geodeziju. Geodetskim instrumentima, osim određivanja statičkih i veoma sporih pomaka, moguće je odrediti i brže (dinamičke) pomake građevina. U svrhu određivanja preciznosti, ograničenja i mogućnosti geodetskih instrumenata provedena su istraživanja u kojima su instrumenti određivali simulirane dinamičke pomake građevina frekvencija do 7,5 Hz, pri izvođenju do 20 mjerenja u sekundi. Ostvareni rezultati pri određivanju simuliranih dinamičkih pomaka kao i rezultati pri mjerenju na krovnoj konstrukciji sportske dvorane "Arena Zagreb" prikazani su u radu.

Ključne riječi: robotizirana mjerna stanica, GPS, dinamički pomaci građevina.

1. Uvod

Zahvaljujući brzom tehnološkom razvitku te stalnim razvojem geodetskih instrumenata i mjernih metoda omogućeno je izvođenje sve složenijih i zahtjevnijih zadataka koji se postavljaju pred inženjersku geodeziju, a koji prate izgradnju i eksploataciju sve većih i kompleksnijih građevina. Određivanjem pomaka i deformacija građevina tijekom eksploatacije dobiva se potvrda ponaša li se građevina u skladu s projektnim rješenjima, a dobiveni podaci predstavljaju važan parametar u procjeni stanja i sigurnosti građevine.

¹ dr. sc. Ante Marendić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: amarendic@geof.hr,
prof. dr. sc. Zdravko Kapović, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: zkapovic@geof.hr,
dr. sc. Rinaldo Paar, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: rpaar@geof.hr.

Zbog mogućnosti određivanja 3D položaja točke u pokretu u apsolutnom sustavu uz izvođenje 10 do 100 mjerenja u sekundi, primjena Globalnih Navigacijskih Satelitskih Sustava (GNSS) i pripadajućih instrumenata te robotiziranih mjernih (totalnih) stanica (RTS) više nije ograničena samo na praćenje statičkih i veoma sporih pomaka građevina, već je instrumentima moguće odrediti i brže (dinamičke) pomake građevina. Na osnovu odgovora građevine na dinamičku pobudu određuju se dinamički parametri građevine (vlastite frekvencije, vlastiti oblici titranja i prigušenja). Dinamički parametri su funkcije globalne krutosti i najbolji su pokazatelji realnog stanja konstrukcije. Svaka ozbiljnija promjena koja se dogodi na konstrukciji uzrokovat će i promjenu vrijednosti dinamičkih parametara (Rak 2005).

Geodetsko praćenje dinamičkih pomaka donedavno je bilo usmjereno samo na fleksibilnije građevine kao što su viseći mostovi, neboderi i tornjevi (Celebi i Sanli 2002, Chen i dr. 2001, Roberts i dr. 2001, Ogaja i dr. 2003, Meng i dr. 2007). Te građevine karakteriziraju pomaci većih iznosa i manjih frekvencija osciliranja. U navedenim projektima uglavnom su korišteni GNSS uređaji s frekvencijom mjerenja od 10–20 Hz (Roberts i dr. 2004). Robotizirane mjerne stanice nisu primjenjivane u navedenim projektima zbog nedovoljne mjerne frekvencije instrumenata. Novije generacije RTS-a imaju mogućnost preciznog određivanja položaja mjerne točke (reflektora) u pokretu s frekvencijom mjerenja i do 20 Hz (Stempfhuber 2009).

S povećanjem preciznosti mjerenja i intervala registriranja mjerenja, omogućeno je praćenje i krutih građevina čije su modalne frekvencije veće od 1 Hz uz manje amplitude osciliranja. Sve navedeno ukazuje na potrebu detaljnije analize postojećih mjernih instrumenata i sustava, te detaljnije analize ostvarive preciznosti pri mjerenju dinamičkih pomaka, a sve u svrhu poznavanja njihovih stvarnih mogućnosti, te mogućih primjena u konkretnim zadacima prilikom uspostave različitih sustava monitoringa.

U ovom radu testirati će se GNSS uređaj (frekvencija mjerenja 20 Hz) i RTS (frekvencija mjerenja do 12 Hz) pri određivanju većih frekvencija osciliranja koje karakteriziraju manje amplitude osciliranja. Na taj način pokušat će se odrediti granične vrijednosti i mogućnosti današnjih geodetskih instrumenata.

Ispitivanje je provedeno na način da su mjerenjima s GNSS uređajem i robotiziranim mjernom stanicom određivane unaprijed zadane frekvencije osciliranja. Za potrebe testiranja u svrhu generiranja periodičkih sinusoidalnih oscilacija sa unaprijed određenim karakteristikama (frekvencija i amplituda osciliranja) korišten je elektrodinamički pobuđivač. Potvrda teorijskih ispitivanja postignuta je konkretnim ispitivanjem na krovnoj konstrukciji sportske dvorane "Arena Zagreb".

2. Određivanje dinamičkih pomaka građevina geodetskim instrumentima

Geodetski monitoring velikih građevina i određivanje njihovih dinamičkih pomaka uglavnom se bazirao na primjeni GPS uređaja (Li 2004, Ogaja i dr. 2007). U prvim projektima monitoringa građevina, predmet istraživanja bilo je ponašanje visokih zgrada i tornjeva uslijed djelovanja vjetera i potresa, te ponašanje velikih mostova uslijed djelovanja prometa i vjetera (Ogaja i dr. 2007). Nakon prvih proje-

kata dinamičkog monitoringa primjenom geodetskih instrumenata, pri čemu se prvenstveno misli na GPS tehnologiju, u kojima je napravljen veliki korak u pogledu primjenjivosti tehnologije, istraživanja se usmjeruju na integraciju senzora (GNSS uređaja, akcelerometara, pseudolita, itd.) i operativnosti sustava monitoringa (Li 2004, Meng i dr. 2007, Barnes i dr. 2005). Integracijom GNSS uređaja i drugih senzora iskorištavaju se prednosti i nadilaze ograničenja pojedinačnih sustava.

Frekvencija mjerenja većine današnjih GNSS uređaja iznosi 10–20 Hz. Konstantnim razvojem GNSS tehnologije danas postoje GNSS uređaji s mjernom frekvencijom od 50 Hz pa čak i do 100 Hz. U radu (Roberts i dr. 2004) prezentirani su ostvareni rezultati testiranja GNSS uređaja (frekvencija mjerenja 50 Hz) pri određivanju dinamičkih pomaka mosta Wilford u Nottinghamu.

RTS predstavlja novu generaciju geodetskih instrumenata (mjernih stanica) koji automatiziranim postupkom imaju mogućnost određivanja koordinata reflektora u pokretu što im omogućava primjenu u projektima određivanja dinamičkih pomaka. Kao prednosti RTS-a može se istaknuti visoko ostvarivu preciznost mjerenja. Za kinematička mjerenja sa svrhom izvođenja preciznih (subcentimetarskih) 3D mjerenja s prikazom rezultata u realnom vremenu, RTS se nameće kao najprihvatljiviji izbor. Međutim, ostvarivanje navedene preciznosti s RTS instrumentima ograničeno je mnogobrojnim čimbenicima te ovisi o karakteristikama RTS-a, tipu korištenog reflektora, atmosferskim uvjetima prilikom mjerenja. Također, brzina kretanja reflektora te njegovo ubrzavanje, mogućnosti servo motora RTS-a pratiti reflektor u pokretu, ponašanje kompenzatora za vrijeme i nakon ubrzanja, te sofisticiranosti algoritama za praćenje reflektora u situacijama prekida signala (Gikas i dr. 2006), utječu na izvođenje kinematičkih mjerenja s robotiziranom mjernom stanicom.

Unatoč svemu, do danas je provedeno vrlo malo ispitivanja RTS-a pri mjerenju dinamičkih pomaka građevina. Veći broj istraživanja bio je usmjeren na određivanje statičkih pomaka građevina (Kovačić i Kapović 2005) te kinematičkih mogućnosti RTS-a u kojima su se reflektori kretali prema unaprijed zadanim trajektorijama pri različitim brzinama. Zadane trajektorije kretanja reflektora su uglavnom kružne i strogo linearne pa je točnost dobivena na osnovu razlika između izmjerene i stvarne koordinate položaja reflektora (Radovanović i dr. 2001, Kopačik i dr. 2005, Kirschner i Stempfhuber 2008, Stempfhuber 2009).

Projekt mjerenja dinamičkih pomaka mosta Wilford u Nottinghamu iz 2002. godine (Cosser i dr. 2003) spada u prva istraživanja primjene RTS-a u mjerenju dinamičkih pomaka. Kao glavni nedostatak autori su istaknuli nedovoljnu frekvenciju mjerenja RTS-a (1 Hz). Noviji modeli RTS-a testirani su pri mjerenjima simuliranih visokofrekventnih dinamičkih pomaka, gdje su ostvareni bolji rezultati zbog veće mjerne frekvencije instrumenta (5–7 Hz). U radovima (Gikas i dr. 2006, Psimoulis i Stiros 2007, Gikas i Daskalakis 2008, Psimoulis i dr. 2008) testirane su robotizirane mjerne stanice i GNSS uređaji pri mjerenju simuliranih visokofrekventnih dinamičkih pomaka. U provedenim ispitivanjima, i RTS i GNSS instrumenti su odredili zadane frekvencije osciliranja u testovima do 4 Hz.

U ovom radu se htjelo ispitati granične mogućnosti mjernih instrumenata pa su simulirani dinamički pomaci frekvencija do 7,5 Hz i amplitudama osciliranja do 3 mm.

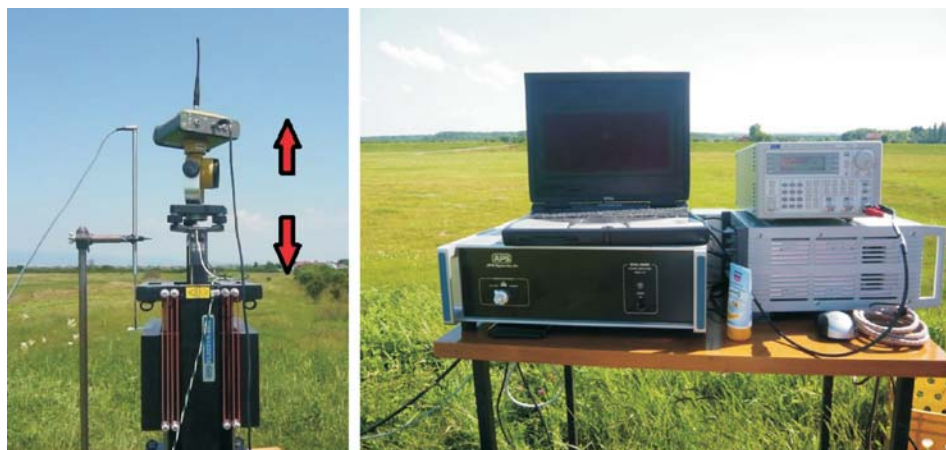
3. Opis testiranja mjernih instrumenata

Geodetski instrumenti testirani su pri određivanju položaja točke u pokretu, u vertikalnoj ravnini. Test je napravljen na način da se geodetskim instrumentima određivao položaj točke koja izvodi harmonično gibanje s unaprijed zadanim vrijednostima amplituda i frekvencija osciliranja.

3.1. Opis testiranja

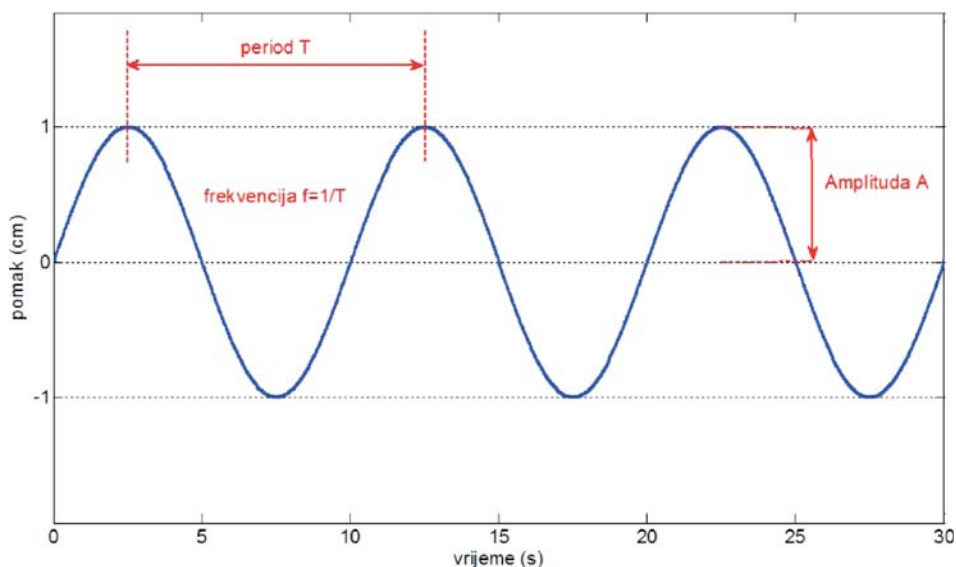
Svrha testa bila je simulirati dinamičke pomake građevina koji nastaju uslijed djelovanja dinamičkog opterećenja na nju. Dinamičko opterećenje može biti vlastito koje je prisutno na konstrukciji (vibrirajući strojevi, kranovi, promet na mostovima, vjetar na tornjevima itd.) te umjetno izazvano opterećenje koje se izazove s prikladnim sredstvima (pobuđivač, padajući teret, naglo otpušteni teret, udar itd.). Djelovanja dinamičkog opterećenja na konstrukciju mogu biti kratkotrajna (vjetar, potres, udar itd.) ili dugotrajna (rad postrojenja u industriji, promet na mostovima itd.). Ponašanje konstrukcije pri dinamičkom opterećenju ovisit će o intenzitetu dinamičkog opterećenja, zakonu promjene opterećenja tijekom vremena, mjestu djelovanja i fizikalnim svojstvima materijala konstrukcije (Rak 2005). Analizom registriranih odgovora konstrukcije na dinamičko opterećenje određuju se dinamički parametri konstrukcije (vrijednosti frekvencija i perioda, osnovnih modalnih oblika titranja te logaritamskog dekrementa prigušenja za svaki modalni oblik) (Krolo i dr. 2007). Svaka ozbiljnija promjena koja se dogodi na konstrukciji uzrokovat će promjenu vrijednosti dinamičkih parametara. Određivanjem dinamičkih parametara mogu se te promjene na konstrukciji pravovremeno uočiti te sanirati uočena oštećenja.

Za potrebe ostvarivanja kontroliranih i unaprijed zadanih simuliranih dinamičkih pomaka građevina korišten je elektrodinamički pobuđivač s pojačalom i generatorom frekvencija (slika 1).



Slika 1. *Elektrodinamički pobuđivač s GNSS uređajem i reflektorom te induktivnim osjetilom (a), generator frekvencija s pojačalom (b).*

Na elektrodinamički pobuđivač postavljao se pokretni GNSS uređaj i reflektor (slika 1a). Pobuđivaču su zadavane unaprijed određene vrijednosti frekvencija i amplituda osciliranja (slika 2). Vrijednosti zadanih amplituda kontrolirane su pomoću induktivnog osjetila (LVDT) (slika 1a). Induktivnim osjetilima mogu se mjeriti pomaci i deformacije s točnošću od 10^{-3} mm, što ukazuje na vrlo precizno određivanje podataka u vertikalnoj ravnini.



Slika 2. Frekvencija, period osciliranja, amplituda.

Testiranje mjernih instrumenata provedeno je na Kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Elektrodinamičkom pobuđivaču bilo je zadano pet amplituda osciliranja (0,3 cm, 0,5 cm, 1 cm, 2,5 cm i 5 cm) te osam frekvencija osciliranja (0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz i 7,5 Hz). U testovima s amplitudom osciliranja 2,5 cm i 5 cm najviše zadane frekvencije iznosile su 4 Hz odnosno 2 Hz iz razloga što s pobuđivačem nije bilo moguće postići veće frekvencije pri tako velikim amplitudama osciliranja. Test za svaku amplitudu i frekvenciju osciliranja trajao je 60 sekundi. Na taj način je, ovisno o mogućnostima pojedinog instrumenta, u svakom testu mjereno između 420 i 1200 dinamičkih pomaka točke.

3.2. Mjerni instrumenti

U testovima su ispitana dva mjerna instrumenta:

- Robotizirana mjerna stanica (Leica TCRP 1201) s frekvencijom mjerenja 10 Hz (10 mjerenja u 1 sekundi),
- GNSS uređaj (Topcon Hiper Pro) s frekvencijom mjerenja 20 Hz (20 mjerenja u 1 sekundi).

Pri mjerenju s robotiziranom mjernom stanicom, nije bilo moguće ostvariti 10 mjerenja u sekundi. Maksimalni broj prikupljenih podataka u jednoj sekundi iznosio je do 7 mjerenja, uz nepravilan vremenski interval između pojedinih mjerenja. S ciljem povećanja broja mjerenja u sekundi, razvijena je aplikacija u Visual Basicu koja se oslanja na geoCOM protokol razvijen od strane proizvođača Leica Geosystems, koja putem prijenosnog računala upravlja instrumentom tijekom mjerenja. Upravljanjem procesom mjerenja na opisani način omogućeno je povećanje prikupljenog broja mjerenja u jednoj sekundi na 12 do 13 mjerenja te uz primjenu aplikacije napisane u programu MatLab, gotovo trenutno učitavanje, obradu i analizu mjernih podataka.

U daljnjem tekstu, za testirane mjerne instrumente, koristit će se slijedeće oznake; RTS-5Hz – robotizirana mjerna stanica Leica TCRP 1201, RTS-12Hz – ista mjerna stanica kada procesom mjerenja upravlja prijenosno računalo pomoću aplikacije razvijene u Visual Basicu, te GNSS-20Hz – Topcon HyperPro GNSS uređaj pri čemu su dinamički pomaci određeni postprocesing kinematičkom metodom.

4. Analiza i obrada rezultata testiranja

Dinamičkom testiranju prethodilo je određivanje preciznosti geodetskih instrumenata pri izvođenju visokofrekventnih mjerenja prema nepokretnoj točki.

4.1. Određivanje preciznosti mjernih instrumenata

U ovom testu se mjernim instrumentima određivao položaj nepokretne točke pri izvođenju mjerenja s maksimalnim frekvencijama mjerenja. Testiranje je imalo za cilj procijeniti odstupanja određenih položaja nepokretne točke pri visokofrekventnim mjerenjima. Mjerni instrumenti postavljeni su na stupove kalibracijske baze Geodetskog fakulteta te su određivali položaj nepokretne točke – stabiliziranog stupa na udaljenosti od 50 m odnosno 100 m. Svako mjerenje trajalo je 90 sekundi.

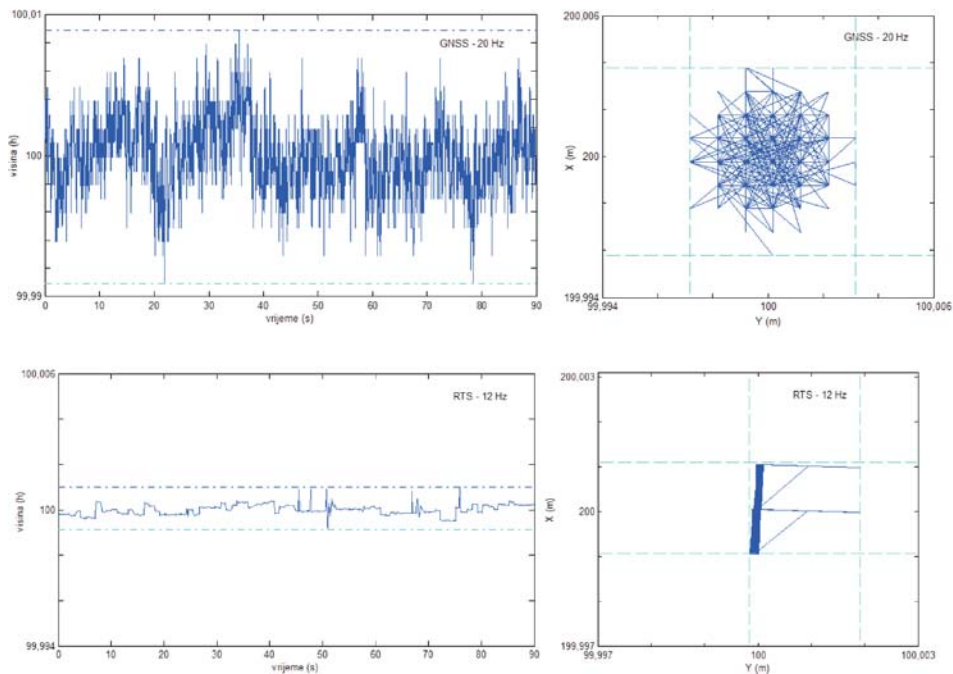
Za mjerne instrumente određeno je standardno odstupanje mjerenja u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini za svaki test. Standardna odstupanja određena su prema sljedećim izrazima:

$$s_{hz} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((\bar{x} - x_i)^2 + (\bar{y} - y_i)^2)} - \text{standardno odstupanje u horizontalnoj ravnini,}$$

$$s_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{h} - h_i)^2} - \text{standardno odstupanje u vertikalnoj ravnini,}$$

gdje su \bar{x} , \bar{y} i \bar{h} najbolje procjene koordinata nepokretne točke u svakom provedenom testu, n je ukupan broj mjerenja, a x_i , y_i i h_i pojedine određene koordinate točke.

Na slici 3 prikazani su rezultati mjerenja za uređaje GNSS-20Hz i RTS-12Hz pri maksimalnim frekvencijama mjerenja za mjernu udaljenost od 100 metara.



Slika 3. Koordinate nepokretne točke određene uređajima RTS-12Hz i GNSS-20Hz u vremenskom intervalu od 90 sekundi.

Na lijevoj strani pojedinih slika prikazane su izmjerene visine točke u testu u obliku vremenskog zapisa (svaka određena visina prikazana je u odnosu na vrijeme mjerenja). Na desnoj strani pojedinih slika prikazane su određene koordinate točke u horizontalnoj ravnini (x i y koordinate). Na navedenim slikama su pravcima prikazane minimalne i maksimalne vrijednosti određenih koordinata.

Najveća odstupanja određenih koordinata točke mogu se uočiti u podacima određenim GNSS-20Hz uređajem (slika 3). Ostvareni rezultati u vertikalnoj ravnini (± 6 mm) znatno su lošiji u odnosu na mjerne podatke u horizontalnoj ravnini (± 4 mm). Precizniji rezultati u odnosu na GNSS-20Hz uređaj ostvareni su s RTS-12Hz uređajem gdje se odstupanja određenih koordinata točke u vertikalnoj ravnini kreću u intervalu ± 0.8 mm te u horizontalnoj ravnini u intervalu ± 1 mm. Izračunata standardna odstupanja prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Standardna odstupanja u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini.

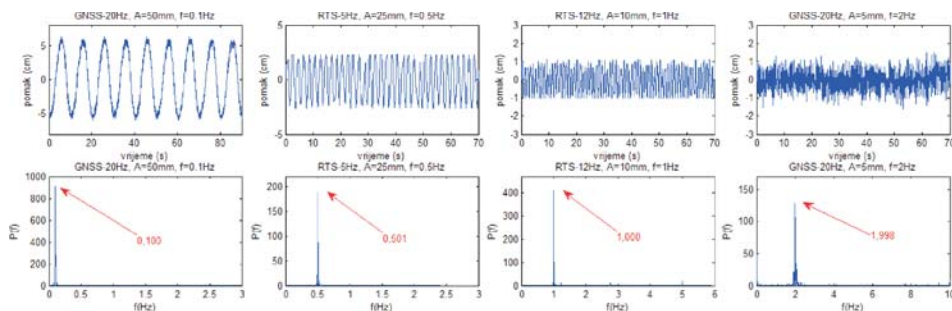
Mjerni instrument	Frekvencija mjerenja	Broj mjerenja	s_v (mm)		s_{hz} (mm)	
			50 m	100 m	50 m	100 m
RTS-5Hz	5 Hz	450	0,1	0,1	0,1	0,4
RTS-12Hz	12 Hz	1080	0,1	0,1	0,1	0,4
GNSS-20Hz	20 Hz	1800	2,5	2,5	0,9	1,2

Iz rezultata mjerenja mogu se uočiti znatno precizniji rezultati ostvareni robotiziranom mjernom stanicom. Također, usporedbom standardnih odstupanja za RTS-5Hz i RTS-12Hz, uočavamo da se prikupljanje većeg broja mjerenja u sekundi s robotiziranom mjernom stanicom nije negativno odrazilo na preciznost mjerenja.

4.2. Određivanje simuliranih dinamičkih pomaka građevina

U drugom dijelu testa, instrumenti su određivali simulirane dinamičke pomake građevina. Prvi korak obrade podataka mjerenja bio je određivanje koordinata u lokalnom koordinatnom sustavu s ishodištem u početnom odnosno srednjem položaju pokretnog djela elektrodinamičkog pobuđivača. Svim mjernim podacima pridruženo je vrijeme mjerenja. Na taj način dobiven je vremenski zapis izmjerenih pomaka u sve tri koordinatne osi (x, y i h), što je bilo neophodno za daljnju obradu i analizu podataka mjerenja.

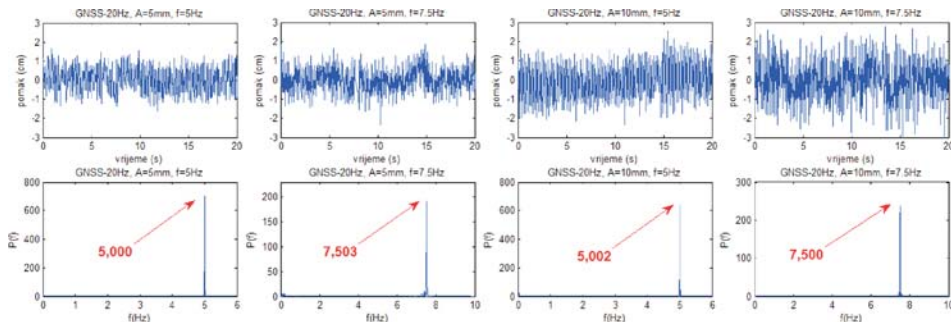
Na slici 4 prikazan je dio rezultata mjerenja i određivanja frekvencija u testovima s zadanim frekvencijama osciliranja od 0,1 Hz do 2 Hz te amplitudama osciliranja od 5 mm do 50 mm. U navedenim testovima, svi ispitani instrumenti odredili su zadane frekvencije osciliranja.



Slika 4. Rezultati mjerenja i određivanja frekvencija u testovima s amplitudama 5–50 mm i frekvencijama osciliranja 0,1–2 Hz.

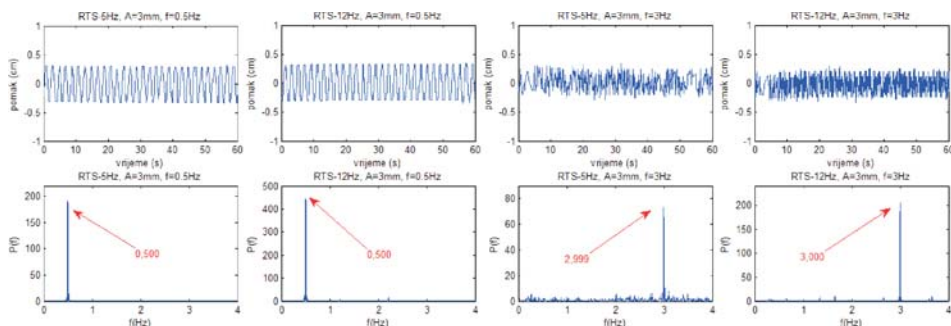
Najmanja zadana amplituda osciliranja iznosila je ± 3 mm. Kod tako malih iznosa simuliranih pomaka, GNSS uređajima nisu dobiveni kvalitetni rezultati. Iz podataka mjerenja, nije bilo moguće odrediti zadane frekvencije osciliranja. Lošiji rezultati su postignuti uslijed ostvarive preciznosti GNSS uređaja u vertikalnoj ravnini u kinematičkom modu rada. Zadani iznosi amplituda osciliranja (pomaka) manji su od ostvarive preciznosti sustava u vertikalnoj ravnini.

Prednosti testiranog GNSS uređaja u odnosu na robotiziranu mjernu stanicu dolaze do izražaja kod zadanih većih frekvencija i amplituda osciliranja. Najveća frekvencija osciliranja u provedenim dinamičkim testovima iznosila je 7,5 Hz. Kod instrumenta RTS-5Hz gdje ima pet do sedam mjerenja u sekundi, nije bilo moguće odrediti dinamičke odgovore frekvencija većih od 3 Hz. Rezultati mjerenja instrumentom GNSS-20Hz pri testovima sa zadanim amplitudama 5 mm i 10 mm te zadanim frekvencijama osciliranja 5 Hz i 7,5 Hz prikazani su na slici 5, gdje se uočavaju uspješno određene zadane frekvencije osciliranja.



Slika 5. Rezultati mjerenja s instrumentom GNSS-20Hz pri testovima sa zadanim amplitudama 5 mm i 10 mm te zadanim frekvencijama osciliranja 5 Hz i 7,5 Hz.

Za razliku od GNSS uređaja, robotiziranom mjernom stanicom, u oba načina mjerenja (RTS-5Hz i RTS-12Hz) uspješno su određene frekvencije osciliranja u testovima od 0,1–3 Hz (slika 6) pri zadanoj amplitudi osciliranja od 3 mm.

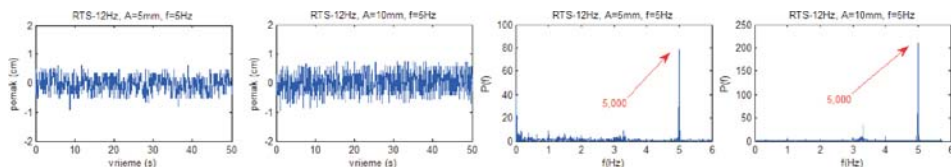


Slika 6. Rezultati određivanja frekvencija s RTS-5Hz i RTS-12Hz – amplituda osciliranja 3 mm i frekvencija osciliranja 0,5 i 3 Hz.

U testovima sa zadanim frekvencijama 3 i 4 Hz, kod instrumenta RTS-5Hz pojavljuje se šum na periodogramu. Šum nastaje kao rezultat pogrešaka instrumenta pri mjerenju duljina i kutova, sinkronizaciji rada pojedinih senzora mjerne stanice (mjerenje duljine, očitavanje horizontalnih i vertikalnih pravaca) te samim mogućnostima servomehanizma pri praćenju reflektora u pokretu. Uslijed navedenog, veće frekvencije osciliranja od 3 Hz, sa instrumentom RTS-5Hz nije bilo moguće odrediti.

Pomoću RTS-12Hz određene su zadane frekvencije osciliranja u testovima s frekvencijom osciliranja od 4 Hz i 5 Hz (slika 7). Pri tome, važno je napomenuti da se u testovima s 5 Hz pojavljuje šum na periodogramu.

Iz rezultata mjerenja sa RTS-om vidi se da je postignuta visoka preciznost mjerenja kod nižih frekvencija osciliranja, te da preciznost opada s povećanjem zadane frekvencije osciliranja. Može se zaključiti da je točnost određivanja dinamičkih pomaka i frekvencija osciliranja ovisna o brzini kojom se reflektor kreće.



Slika 7. Rezultati određivanja frekvencija – amplituda 3 i 5 mm i frekvencija osciliranja 5 Hz s instrumentom RTS-12Hz.

5. Ispitivanja građevina u praksi

U nastavku će se prikazati mogućnosti primjene geodetskih instrumenata pri određivanju dinamičkog odgovora građevina. Teorijska razmatranja provjerena su na višenamjenskoj sportskoj dvorani “Arena Zagreb”.

Sportska dvorana “Arena Zagreb” (slika 8) najveća je sportska dvorana u Hrvatskoj a izgrađena je za potrebe održavanja 21. Svjetskog rukometnog prvenstva održanog početkom 2009. godine. Zbog složenosti i veličine građevine, na dvorani je postavljen monitoring sustav za praćenje mehaničkog ponašanja krovne konstrukcije u uporabi.

Krovna konstrukcija “Arene Zagreb” približno je pravokutnoga tlocrtnog oblika nad površinom otprilike 143 x 104 m. Krovna konstrukcija sastoji se od zaobljenih glavnih nosača raspona $L = 104$ m, koji su ovješeni (Duvnjak i dr. 2010). Glavno uže je na najvišim točkama ovješeno na armiranobetonske prednapete lamele u



Slika 8. Sportska dvorana “Arena Zagreb”.

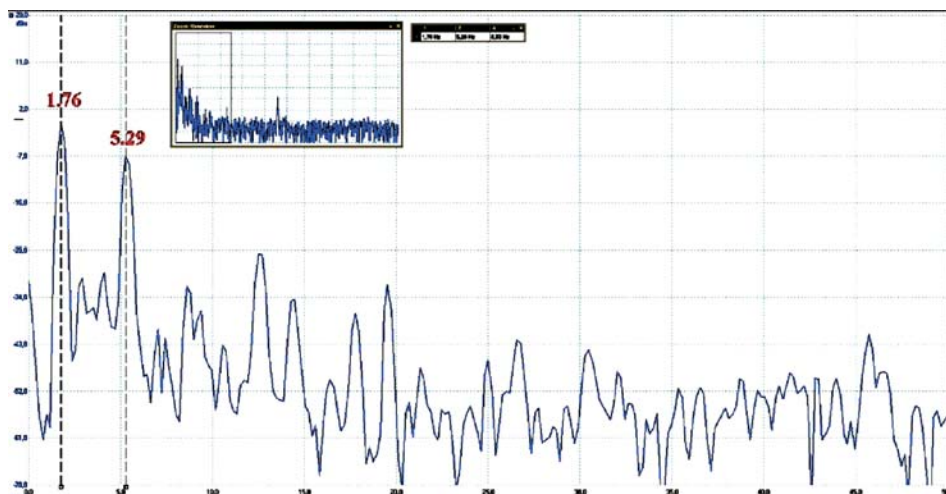
smjeru istok–zapad, dok su glavni čelični nosači u donjem pojasu oslonjeni na armiranobetonsku konstrukciju dvorane. U smjeru sekundarnih nosača (sjever–jug) projektirane su dvije usporedne prostorne stabilizacijske čelične rešetke, čija je zadaća ravnomjerno prenošenje opterećenja na susjedne sklopove.

Određivanje vlastitih frekvencija u glavnim kabelima krovne konstrukcije na objektu “Arena Zagreb” provedeno je pomoću akcelerometra koji je bio pričvršćen na sredini glavnog kabela (slika 10c), a pobuda je vršena unjihavanjem kabela u poprečnom smjeru. Dinamički odgovor konstrukcije zabilježen je pri slobodnom istitravanju nakon prestanka pobude.

Osnovne vlastite frekvencije određene su iz funkcije spektralne gustoće snage dinamičkog odgovora u realnom vremenu (slika 9). U tablici 2 prikazane su prve dvije vlastite frekvencije glavnog kabela određene akcelerometrom.

Tablica 2. Izmjerene vlastite frekvencije.

Vlastita frekvencija	Izmjerena frekvencija (Hz)
1.	1,76
2.	5,29



Slika 9. Prva (1,76 Hz) i druga (5,29 Hz) vlastita frekvencija titranja glavnog kabela.

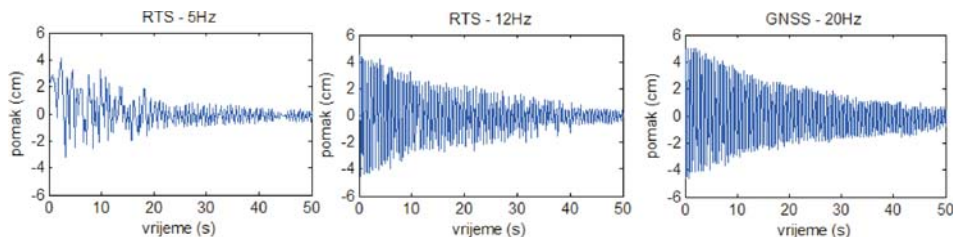
Dinamički odgovor konstrukcije na pobudu određivan je i robotiziranom mjernom stanicom i GNSS uređajem (slika 10).

Izmjereni odgovor glavnog kabela u horizontalnoj ravnini izazvan pobudama tijekom ispitivanja prikazan je na slici 11.

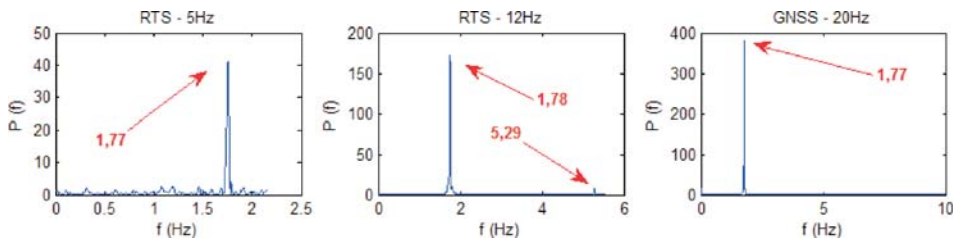
Slika 12 prikazuje vlastite frekvencije glavnog kabela određene na osnovu mjerenih podataka svakog pojedinog instrumenta primjenom metoda spektralne analize.



Slika 10. Robotizirana mjerna stanica (a), pokretni GNSS uređaj i LVDT senzor (b), reflektor i akcelerometar pričvršćeni na glavnom kabelu (c).



Slika 11. Odgovor glavnog kabela u horizontalnoj ravnini izazvan pobudom.



Slika 12. Određivanje vlastitih frekvencija titranja glavnog kabela za mjerne instrumente.

Oba mjerna instrumenta odredila su prvu vlastitu frekvenciju glavnog kabela od 1,76 Hz. Iz podataka mjerenja robotiziranom mjernom stanicom određena je i druga vlastita frekvencija glavnog kabela od 5,29 Hz. Kod primjene robotizirane mjerne stanice za određivanje frekvencija glavnog kabela uočava se prednost i značaj prikupljanja većeg broja mjerenja u jednoj sekundi. Kod navedenog instrumenta, pomoću napisane aplikacije za upravljanje RTS pomoću GeoCOM protokola (RTS-12Hz), koja je omogućila prikupljanje i do 12 mjerenja u sekundi, uspješno je određena i druga frekvencija osciliranja glavnog kabela što nije bilo moguće odrediti s mjernim podacima prikupljenih pomoću funkcija ugrađenih u instrument (RTS-5Hz).

Određivanjem vlastitih frekvencija titranja glavnih kablova krovne konstrukcije sportske dvorane "Arena Zagreb" geodetski instrumenti su dokazali mogućnost primjene u projektima određivanja dinamičkog odgovora građevinskih konstrukcija.

6. Zaključak

Cilj ovog rada bio je odrediti stvarne mogućnosti ispitanih mjernih instrumenata pri određivanju dinamičkog odgovora građevina. Iz tog razloga simulirani su dinamički pomaci frekvencija do 7,5 Hz i amplituda osciliranja do 3 mm. Mjernim instrumentima određivani su simulirani (izazvani) dinamički pomaci, te je ispitana mogućnost određivanja, na osnovu mjernih podataka zadanih frekvencija osciliranja.

Najmanja zadana amplituda osciliranja u testovima iznosila je 3 mm. Manje amplitude osciliranja nije bilo moguće dovoljno precizno zadati pomoću testnog sustava. Na osnovu rezultata mjerenja postignutih robotiziranom mjernom stanicom u testu s amplitudom osciliranja 3 mm možemo zaključiti da taj iznos za RTS ne predstavlja granične mogućnosti te da mogu odrediti, pod povoljnim uvjetima, dinamičke odgovore građevina koje karakteriziraju i manje amplitude osciliranja od 3 mm uz frekvencije osciliranja do 5 Hz.

Milimetarske amplitude osciliranja predstavljale su problem GNSS uređaju zbog ostvarive preciznosti sustava u kinematičkom modu rada. Pri amplitudama osciliranja od 3 mm GNSS uređaj nije uspio odrediti zadane frekvencije osciliranja. U testovima s amplitudama osciliranja 5 mm zadane frekvencije osciliranja su uspješno određene.

Prednosti testiranog GNSS uređaja u odnosu na robotiziranu mjernu stanicu dolazi do izražaja kod većih frekvencija osciliranja pri testovima s većim amplitudama. GNSS uređaj uspješno je odredio najveću zadanu frekvenciju osciliranja u provedenim dinamičkim testovima od 7,5 Hz pri amplitudama osciliranja većim od 5 mm.

Za potrebe prikupljanja većeg broja mjernih podataka u sekundi kod robotizirane mjerne stanice napisana je aplikacija za upravljanje procesom mjerenja pomoću računala. Pomoću navedene aplikacije omogućeno je prikupljanje 12 mjerenja u sekundi, dok je bez aplikacije, testiranim mjernim instrumentom omogućeno prikupljanje 5 do 7 mjerenja. Analizom rezultata mjerenja uočeno je da se veći broj mjernih podataka u sekundi nije negativno odrazio na preciznost mjerenja a omogućio je određivanje većih frekvencija osciliranja. Značaj većeg broja mjerenja u sekundi pokazao se kod mjerenja na Areni Zagreb gdje je pomoću napisane aplikacije uspješno određena i druga frekvencija osciliranja glavnog kabela što nije bilo moguće odrediti s mjernim podacima prikupljenim pomoću funkcija ugrađenih u instrument.

Na osnovu provedenih dinamičkih ispitivanja ostvaren je jedan od ciljeva rada, a to je dokazati da geodetski mjerni sustavi imaju mogućnost određivanja dinamičkog odgovora građevina u eksploataciji. Potvrda teorijskih ispitivanja dobivena je dinamičkim ispitivanjima krovne konstrukcije sportske dvorane "Arena Zagreb". Na sportskoj dvorani, mjerni instrumenti uspješno su odredili prvu vlastitu frekvenciju titranja glavnog kabela krovne konstrukcije ($f_1 = 1,76$ Hz) te je pomoću RTS i razvijene aplikacije uspješno određena i druga frekvencija osciliranja glavnog kabela ($f_2 = 5,29$ Hz).

Važno je istaknuti da se s daljnjim povećanjem preciznosti i frekvencije mjerenja instrumenata koje se očekuje u bliskoj budućnosti, očekuju i pomicanja granica mogućnosti primjene geodetskih instrumenata u navedenim projektima.

Literatura

- Barnes, J., Rizos, C., Lee, H. K., Roberts, G. W., Meng, X., Cosser, E., Dodson, A. H. (2005): The integration of GPS and pseudolites for bridge monitoring, In "A Window on the Future of Geodesy", F. Sanso (ed.), IAG Symp., 128, Springer-Verlag, 83–88.
- Celebi, M., Sanli, A. (2002): GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures, *Earthq Spectra*, 18, 1, 47–61.
- Chen, Q., Huang, D. F., Ding, X. L., Xu, Y. L., Ko, J. M. (2001): Measurement of vibrations of tall buildings with GPS, *Proc. health monitoring and management of civil infrastructure systems*, Bellingham (WA), SPIE, 477–484.
- Cosser, E., Roberts, G. W., Meng, X., Dodson, A. H. (2003): Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station, *Proceedings of 11th FIG symposium on deformation monitoring*, Santorini, Greece.
- Duvnjak, I., Rak, M., Damjanović, D. (2010): Probno ispitivanje krovnih konstrukcija, *Građevinar*, 10, 887–896.
- Gikas, V., Daskalakis, S. (2006): Full scale validation of tracking total stations using a long stroke electrodynamic shaker, *XXIII FIG congress shaping the change*, Munich.
- Gikas, V., Daskalakis, S. (2008): Comparative testing and analysis of RTS vs. GPS for structural monitoring using calibration measurements upon sinusoidal excitation, *XXIII FIG symposium on deformation measurement and analysis*, Lisbon, Portugal.
- Kirschner, H., Stempfhuber, W. (2008): The Kinematic Potential of Modern Tracking Total Stations – A State of the Art Report on the Leica TPS1200+, *1st International Conference on Machine Control & Guidance*.
- Kopačik, A., Kyronović, P., Kadlecikova, V. (2005): Laboratory tests of robot stations, *Proceedings of FIG working week*, Cairo.
- Kovačić, B., Kapović, Z. (2005): Precision and results reliability analysis of different instruments for investigating vertical micro-displacement of structures, *Survey review – Dir. Overseas Surv.*, 38, 297, 190–203.
- Krolo, J., Kapović, Z., Rak, M. (2007): Statičko i dinamičko ispitivanje konstrukcija, *Simpozij o inženjerskoj geodeziji*, Zbornik radova, Hrvatsko geodetsko društvo, Beli Manastir, 109–116.
- Li, X. (2004): Integration of GPS, accelerometers and optical fibre sensors for structural deformation monitoring, *17th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U. S. Institute of Navigation*, Long Beach, California, 211–224.
- Meng, X., Dodson, A. H., Roberts, G. W. (2007): Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers, *Engineering Structures*, 29, 3178–3184.
- Ogaja, C., Li, X., Rizos, C. (2007): Advances in structural monitoring with Global Positioning System technology: 1997–2006, *Journal of Applied Geodesy*, 1, 3, 171–179.
- Ogaja, C., Wang, J., Rizos, C. (2003): Detection of wind-induced response by wavelet transformed GPS solutions, *Journal of Surveying Engineering*, 129, 3, 99–104.
- Psimoulis, P., Pytharouli, S., Karambalis, D., Stiros, S. (2008): Potential of GPS to measure frequencies of oscillation of engineering structures, *Journal of Sound and Vibration* 2008.

- Psimoulis, P., Stiros, S. (2007): Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using robotic theodolites (RTS), *Engineering Structures*, 29, 3312–3324.
- Radovanovic, R. S., Teskey, W. F. (2001): Dynamic monitoring of deforming structures: GPS versus robotic tacheometry systems, *Proceedings of 10th FIG symposium on deformation measurements*, Orange, California, 61–70.
- Rak, M. (2005): Ispitivanje konstrukcija, skripta, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka.
- Roberts, G. W., Cosser, E., Meng, X., Dodson, A. H. (2004): High frequency deflection monitoring of bridges by GPS, *Journal of Global Positioning Systems*, 3, 1–2, 226–231.
- Roberts, G. W., Meng, X., Dodson, A. H. (2001): The Use of kinematic GPS and triaxial accelerometers to monitor the deflections of large bridges, *10th FIG Int. Symp. on Deformation Measurements*, Orange, California, 268–275.
- Stempfhuber, W. (2009): Verification of the Trimble universal total station (uts) performance for kinematic applications, Grün/Kahmen (Eds), *Optical 3-D Measurement Techniques IX*, 2009, Vienna, 211–221.

Possibilities of Surveying Instruments in Determination of Buildings' Dynamic Displacements

ABSTRACT. Determination of construction displacements and deformations are an important parameter in assessing the condition and safety of the construction in its exploitation. Also, we get confirmation whether a structure is consistent with project solutions. Constant development of surveying instruments enables us to deal with more complex and demanding tasks that are facing engineering geodesy. Surveying instruments can measure, not only static and very slow displacements of the constructions, but also and faster (dynamic) displacements. In order to determine the accuracy, limitation and possibilities of surveying instruments, dynamic displacements of the constructions were simulated at the testing field. Surveying instruments were measuring simulated dynamic displacements with predefined frequency (up to 7.5 Hz) and amplitude of oscillation. Achieved results from the testing field, as well as results of the measurements from the roof construction of sports hall "Arena Zagreb" are presented in the paper.

Keywords: Robotic total station, GPS, dynamic displacements of the structures.

Primljeno: 2013-07-19

Prihvaćeno: 2013-09-06